

# 水轮机调节中高精度模糊控制器的应用

田 勇<sup>1</sup> 沈祖诒<sup>2</sup>

(1. 河南工业大学机电工程学院, 河南 郑州 450007; 2. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要** : 设计了高精度模糊控制器的输入、输出伸缩因子及模糊控制规则和控制器的结构, 对水轮机调节系统建立近似数学模型。分别用固定参数 PID 控制器、普通模糊控制器、高精度模糊控制器在水轮机受负荷干扰、传递系数变化的情况下进行仿真研究, 得出结论: 在被控对象数学模型不够精确、参数发生变化或发生负荷扰动时, 高精度模糊控制器的动态特性好, 鲁棒性强, 优于其他两种控制器。

**关键词** : 高精度模糊控制器; 伸缩因子; 水轮机调节系统; 数学模型; 仿真试验

**中图分类号** : TV74; TK730.7 **文献标识码** : A **文章编号** : 1006-764X(2006)05-0055-04

**Application of high precision fuzzy controller to turbine regulation system** // TIAN Yong<sup>1</sup>, SHEN Zhu-yi<sup>2</sup> (1. School of Mechanical & Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450007, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract** : The input and output contraction-expansion factor, the fuzzy control rule, and the structure of high precision fuzzy controller were designed, and a model for simulation of turbine regulation system was developed. A simulative study is performed of the turbine regulation system by use of the PID controller with invariable parameters, common fuzzy controller, and high precision fuzzy controller under the condition that the load disturbance is considered and the transfer coefficient is varied. It is concluded that the high precision fuzzy controller is superior to the other two controllers in dynamic characteristic and robustness when the mathematic model of the objectives to be controlled is not precise enough, and the parameters and loads are variable.

**Key words** : high precision fuzzy controller; contraction-expansion factor; turbine regulation system; mathematical model; simulative test

水轮机调节的基本任务是根据电力系统负荷的不断变化来调节水轮发电机组的有功功率输出, 并维持机组频率在规定的范围之内。水轮机调节系统是一个集水力、机械、电气为一体的复杂控制系统<sup>[1]</sup>。由于水轮机调节对象的特性十分复杂, 是典型的非线性时变系统, 原则上应采用自适应控制, 传统的固定参数 PID 控制器已经很难满足要求。模糊控制适合应用于复杂时变、非线性和数学模型难以表达的系统, 但普通模糊控制器很难满足其高精度控制和动态特性的使用要求。高精度模糊控制器由于改进了算法, 克服了普通模糊控制器在微偏差范围内控制精度差的难题, 同时保留了其粗调快速的优点, 在一些工业场合已经取得成功<sup>[2]</sup>。

## 1 高精度模糊控制器设计

### 1.1 论域可变的模糊控制策略

李洪兴对模糊控制器的数学本质进行了分析,

并于 1997 年提出了“可变论域”的思想<sup>[3]</sup>。王立新证明了模糊系统是万能逼近器<sup>[4]</sup>, Buckley 证明了 Sugeno 控制器也是万能逼近器<sup>[5]</sup>, 李洪兴证明了模糊控制器就是插值器<sup>[6]</sup>, 由插值得到的响应函数是否充分地逼近真实响应函数, 取决于峰点之间距离是否充分的小<sup>[7]</sup>。这意味着控制规则要很多很多, 这对于依赖领域专家知识总结控制规则的模糊控制器来说是做不到的。以误差减小为例, 随着控制过程的进行, 误差缩小, 即向零位靠近, 若模糊控制隶属度函数的论域及其划分不变, 以此进行推理, 产生的控制量越来越小, 甚至为零, 造成控制“死区”, 控制结果的精度自然不高, 其原因在于原来的论域对于缩小后的误差显得偏大。在规则形成(隶属函数形状)不变的前提下, 论域随着误差变小而收缩(亦可随着误差增大而膨胀), 如图 1 所示(图中  $\mu$  为隶属度函数), 初始论域  $[-E, E]$  通过伸缩因子  $\alpha(x)$  变换为  $[-\alpha(x)E, \alpha(x)E]$ , 其中  $\alpha(x)$  为误差变量

$x$  的连续函数  $\alpha(x) \in [-1, 1]$ ;  $E$  为误差论域的最大值;  $\alpha(x)E$  为论域的实际值。

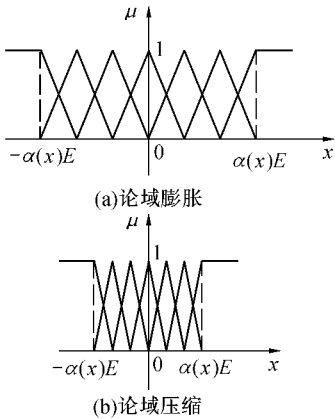


图 1 论域的压缩与膨胀

显然,这种可变论域的模糊控制器其论域随误差的变化而变化。不难理解,虽然只给出论域上的几条规则,但是通过论域的压缩,这几条规则会生成任意多条规则,从而使插值节点的距离充分的小,能够满足事先给定的任意精度,这种模糊控制器本质上是一种自适应控制器。

### 1.2 可变论域的高精度模糊控制器设计

给定双输入、单输出模糊控制器,其输入论域  $X = [-E, E]$ ,  $Y = [-E_c, E_c]$ , 输出论域  $V = [-U, U]$  这里  $E, E_c$  与  $U$  均为正实数;  $X, Y$  与  $V$  为初始论域。

#### 1.2.1 可变论域的定义

称函数  $\alpha: X \rightarrow [0, 1], x \mapsto \alpha(x)$  为论域  $X$  的一个伸缩因子,如果满足:①对偶性:  $\forall x \in X$  使得  $\alpha(x) = \alpha(-x)$ ; ②保零性:  $\alpha(0) = 0$ ; ③单调性:  $\alpha$  在  $[0, E]$  上严格单调递增; ④协调性:  $\forall x \in X$  使得  $|x| \leq \alpha(x)E$ ; ⑤正规性:  $\alpha(\pm E) = 1$ 。

任取  $x \in X$ , 记  $X(x) \triangleq \alpha(x)X \triangleq [-\alpha(x)E, \alpha(x)E] \triangleq \{\alpha(x)x' \mid x' \in X\}$ , 称  $X(x)$  为  $X$  上的变论域。

同理可规定  $Y$  的伸缩因子  $\beta: Y \rightarrow [0, 1], y \mapsto \beta(y)$  以及  $Y$  上的变论域  $Y(y) \triangleq \beta(y)Y$ 。

#### 1.2.2 双输入、单输出模糊控制器伸缩因子的设计

设  $0 < \tau < 1$ , 令  $\alpha(x) = \left(\frac{|x|}{E}\right)^\tau, \beta(y) = \left(\frac{|y|}{E_c}\right)^\tau$ , 则  $\alpha(x), \beta(y)$  为满足定义的输入伸缩因子<sup>[8]</sup>。其中  $x, y$  分别代表模糊控制器的输入误差  $e_e$  和误差变化率  $e_c$ ;  $E, E_c$  分别代表误差和误差变化率的论域。输出伸缩因子  $\gamma(z)$  是控制器与系统进行信息交换的主要“接口”, 因为  $z$  是时间的函数, 所

以  $\gamma(z)$  也可以写成  $\gamma(z(t))$ , 简记为  $\gamma(t)$ 。

令控制误差  $W(t) = r(t) - o(t)$ , 其中  $r(t)$  为参考输入,  $o(t)$  为被控对象的输出。采用变论域自适应模糊控制器的目的是使  $o(t)$  能渐近地跟踪  $r(t)$ , 最终使  $\lim_{t \rightarrow \infty} \|W(t)\| = 0$ 。

故伸缩因子为  $\gamma(t) = K \int_0^t W(\tau) d\tau + \gamma(0)$ , 其中  $K$  为比例常数, 取为 2;  $W(\tau)$  为误差向量的时间变量;  $\gamma(0)$  为初值, 取为 1。由于输出论域的伸缩因子包含了对误差的积分作用, 可以使本来具备 PD 特性的普通模糊控制器隐含有积分特性, 它对于模糊控制器消除系统的静态误差有重要的意义。

总结水轮机调节经验, 经过 ITAE 指标优化的模糊控制规则<sup>[9]</sup>如表 1 所示, 高精度模糊控制器的结构原理如图 2 所示,  $\gamma(t)$  隐含在控制函数中。

表 1 模糊控制规则

| $E$ | $E_c$ |    |    |    |    |
|-----|-------|----|----|----|----|
|     | NB    | NS | ZE | PS | PB |
| NB  | PB    | PB | PM | PM | NS |
| NS  | PB    | PM | PS | PS | NM |
| ZE  | PM    | PS | ZE | NS | NM |
| PS  | PM    | PS | NS | NM | NB |
| PB  | NS    | NM | NM | NB | NB |

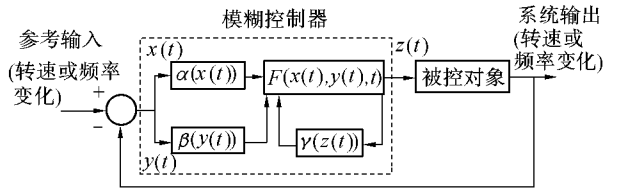


图 2 高精度模糊控制器结构

## 2 水轮机调节系统近似数学模型

电液随动系统简化后的传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{T_y s + 1} \quad (1)$$

式中:  $T_y$  为主接力器时间常数。

考虑刚性水击作用的水轮发电机组段传递函数为

$$G(s) = e_y \frac{1 - kT_w s}{1 + e_{qh} T_w s} \quad (2)$$

式中:  $e_y$  为水轮机力矩对导叶开度传递系数;  $e_{qh}$  为水轮机流量对水头的传递系数;  $T_w$  为水流惯性时间常数;  $k = \frac{e_{qy} e_h}{e_y} - e_{qh}$ , 其中  $e_{qy}$  为水轮机流量对导叶开度的传递系数,  $e_h$  为水轮机力矩对水头的传递系数。

水轮机力矩至发电机转速的传递函数为

$$G_g(s) = \frac{1}{T_a s + e_n} \quad (3)$$

式中:  $T_a$  为机组的惯性时间常数;  $e_n$  为机组综合自调节系数,  $e_n = e_g - e_x$ , 其中,  $e_g$  为发电机自调节系

数  $e_x$  为水轮机自调节系数。

### 3 高精度模糊控制器的应用仿真

#### 3.1 3种控制器的水轮机调节仿真

某单机、单管混流式水轮机调节系统,其调节对象参数为: $e_y = 0.74$ ,  $e_{qh} = 0.491$ ,  $e_h = 1.46$ ,  $e_{qy} = 0.789$ ,  $k = 1.066$ ,  $T_w = 1.62$  s,  $T_a = 6.67$  s,  $e_n = 1$ 。以此参数作为 PID 控制器的调定参考。由实际控制的要求,频率小范围波动误差不超过理想值的  $\pm 5\%$ ,实际误差  $e_e = [-0.05, 0.05]$ ,误差变化率  $e_c = [-0.5, 0.5]$  输出  $u = [-40, 40]$  取  $E, E_C, U$  论域均为  $[-5, 5]$  相应的量化因子  $k_e = 100$ ,  $k_{e_c} = 10$ ,比例因子  $k_u = -8$ 。高精度模糊控制器的  $\tau$  取 0.12。

下面研究水轮机调节系统发电机转速两种工作状态的响应。①表示在无负载干扰情况下,施以 2.5 Hz(5%) 频率扰动,以此作为阶跃输入的动态响应。②加入 10% 的负载干扰时频率变化的动态响应。分别用固定参数 PID 控制器、普通模糊控制器、高精度模糊控制器对水轮机调节系统进行了仿真对比研究。固定参数 PID 控制器在施以 5% 频率扰动作为阶跃输入情况下调定的最优参数: $T_p = 1.6903$ ,  $K_I = 0.2235$ ,  $T_D = 1.5876$ 。从图 3 和图 4(图中  $df/f$  为频率变化率)的对比可以看出:在某种调定工作状态,可能 PID 控制器动态特性是最佳的,而普通模糊控制器是较差的,但是,当工作状态改变时(10% 甩负荷),高精度模糊控制器动态特性最佳, PID 控制器较差,普通模糊控制器中等。所以,综合实际工况经常处于负荷变化的情况,高精度模糊控制器能够满足实际需要,综合效果最佳。

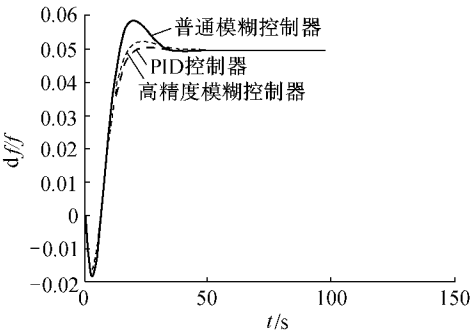


图 3 发电机频率变化 5% 时阶跃响应

#### 3.2 水轮机传递系数变化时的仿真研究

水轮机调节中一项重要的内容是根据系统被控制对象的参数调定控制器参数值,水轮机传递系数的值是控制器调节的重要参考依据。然而,这些传递系数的计算要依赖水轮机模型综合特性曲线,因此,存在不精确性,而且,它们随工况变化而变化,这些都会对水轮机调节带来影响。两种相近工况的水

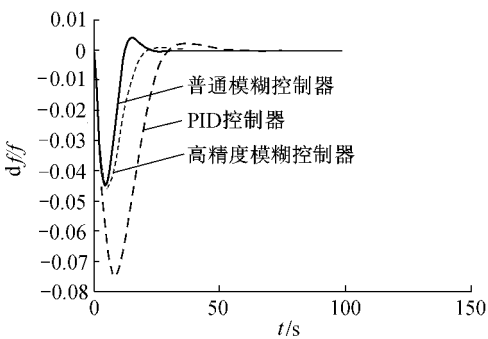


图 4 甩 10% 负荷时的发电机转速阶跃响应  
轮机传递系数见表 2,以 a 组值作为控制器调节的参考值,并将 b 组值与 a 组值时的动态响应进行对比研究。

表 2 两种工况的水轮机传递系数

| 工况  | $e_y$ | $e_h$ | $e_{qy}$ | $e_{qh}$ | $k$   |
|-----|-------|-------|----------|----------|-------|
| a 组 | 0.74  | 1.46  | 0.789    | 0.491    | 1.066 |
| b 组 | 0.57  | 1.40  | 0.692    | 0.510    | 1.190 |

从图 5 和图 6 可以看出,两组相近工况的水轮机传递系数的水轮机调节系统在固定参数 PID 控制器调节下,动态响应表现出较大的差异,与实际情况不大相符,而在高精度模糊控制器调节下,两组曲线存在少许不同,这是两种相近工作状态不同的正常反应。显然,在水轮机传递系数的值难以得到精确值的情况下调节水轮机,高精度模糊控制器有较强的鲁棒性,而固定参数 PID 调节器的鲁棒性差。

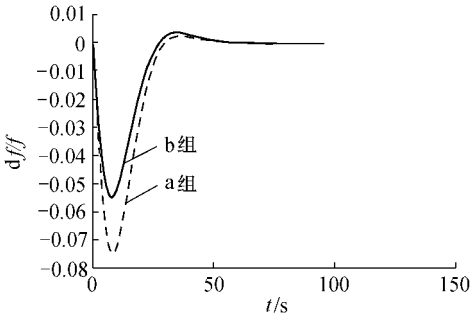


图 5 PID 控制器在水轮机传递系数变化时的仿真

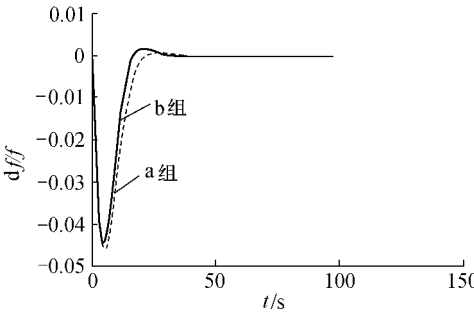


图 6 高精度模糊控制器在水轮机传递系数变化时的仿真

### 4 结 论

通过固定参数 PID 控制器、普通模糊控制器、高精度模糊控制器对水轮机调节系统在不同条件下进

行的仿真试验,得出结论:在被控对象数学模型不够精确、参数发生变化或发生负荷扰动时,高精度模糊控制器的动态特性好、鲁棒性强,综合性能优于其他两种控制器。

参考文献:

[1] 沈祖诒.水轮机调节[M].北京:水利水电出版社,1998.  
[2] 田勇,沈祖诒.变论域模糊控制器及其应用研究[J].现代制造工程,2005(4):98-100.  
[3] 李洪兴.Fuzzy控制的本质与一类高精度Fuzzy控制器的设计[J].控制理论与应用,1997,14(6):868-872.  
[4] WANG Li-xin.Fuzzy systems are universal approximator[C]//IEEE International Conference on Fuzzy Systems, France, Nice, 1992:1163-1170.

(上接第44页)分布在两端拱座、右岸F18断层以及右岸下游岸坡。

由以上成果可以看出:①左岸主要层间错动带滑动的可能性要大一些。②结构面sh5左岸有大范围 $K_f \leq 1.3$ 的区域,因此,该结构面的稳定性应引起重视。③结构面C3在右岸有大范围 $K_f < 1.3$ 的区域,右坝肩下游靠近临空面附近还存在 $K_f < 1.0$ 的区域,表明该区域可能会出现局部性破坏。但从结构面产状来看,右岸为逆向坡,对保持岩体稳定有利。其次,为了保证下游岸坡安全,可以采取表面性保护措施。④结构面sh7上的点安全系数基本上都大于1.3,稳定性较好。

4 结 语

本文通过对白鹤滩大坝系统的应力、变形、屈服的数值分析,得到以下几点认识:①坝基内的结构面有屈服现象。其中陡倾角结构面中以F17屈服最为严重,而缓倾角结构面则是sh5和C3最为严重。②采用强度储备法,得到白鹤滩拱坝强度储备安全度

(上接第54页)的缺水率较其他子系统小。根据对计算结果的分析表明模型的供需分析结果比较合理。

3 结 语

南水北调工程是实现我国水资源优化配置的战略举措。本文在考虑南水北调东线供水条件下,根据大系统分解协调理论建立以区域供水系统缺水率最小为目标的水资源供需分析数学模型,将其运用于济南市水资源供需分析研究中,计算结果表明了模型的合理性和可用性,为多水源联合供水地区的水资源供需分析计算提供了新的参考。

参考文献:

[1] 周祖光.海南省水资源供需分析[J].水利经济,2005,23

[5] BUCKLEY J J. Sugeno type controllers are universal fuzzy controllers[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1993, 53: 299-303.  
[6] 李洪兴.模糊控制的插值机理[J].中国科学: E 辑, 1998, 28(3): 259-267.  
[7] ZENG Xue-jin, SINGH M G. Approximation theory of fuzzy systems SISO case[J]. IEEE Trans Fuzzy Systems, 1994, 2(2): 162-176.  
[8] TIAN Yong, SHEN Zu-yi. Study of contraction-expansion factor on the variable universe adaptive fuzzy controller[C]//YAO Hong-kang, Computational Intelligence and Industrial Applications, 西安:世界图书出版公司, 2004: 390-394.  
[9] 高新陵, 周锐, 朱碧田. 寻孔模糊控制器研究与开发[J]. 河海大学学报:自然科学版, 1999, 27(4): 30-34.

(收稿日期: 2005-10-21 编辑: 骆超)

在3.0~3.5之间,采用水位超载法时,得到水头超载安全度为1.5~1.6,而采用水密度超载法时,水密度超载安全度为2.0~2.3,综合的整体安全度是有一定保障的。③结构面sh5左岸有大范围区域点安全系数 $K_f \leq 1.3$ ,该结构面的稳定性应引起重视。结构面C3在右岸有大范围区域点安全系数 $K_f \leq 1.3$ ,右坝肩下游靠近临空面附近还存在 $K_f < 1.0$ 的区域,表明该区域可能会出现局部性破坏。但从结构面产状来看,右岸为逆向坡,对保持岩体稳定有利。本文分析所得成果可为设计施工提供有益的参考。

参考文献:

[1] 朱伯芳.有限单元法原理与应用[M].北京:中国水利水电出版社,2000:314-323.  
[2] 山田嘉昭.非线性有限元法基础[M].钱仁耕,乔端,译.北京:清华大学出版社,1988:102-121.  
[3] 任青文.岩体平衡分析方法的研究进展[J].岩石力学与工程学报,2001,20(增刊2):1303-1309.  
[4] 陈火红. MSC. Marc/Mentat 2003 基础与应用实例[M].北京:科学出版社,2004:158-166.

(收稿日期: 2005-10-13 编辑: 骆超)

(3): 47-49.  
[2] 吴伟, 张剑峰. 沈阳市水资源供需分析及可持续利用战略研究[J]. 水资源保护, 2004(3): 40-42.  
[3] 陈守真, 余爱珍. 福建省水资源供需分析与对策研究[J]. 福建师范大学学报:自然科学版, 1997, 13(4): 107-112.  
[4] 张会言, 王煜, 张新海, 等. 西北地区水资源供需分析和配置方案[J]. 人民黄河, 2002, 24(6): 17-19.  
[5] 黄永基, 马滇珍. 区域水资源供需分析方法[M]. 南京: 河海大学出版社, 1990: 43-63.  
[6] 朱道立. 大系统优化理论和应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1988.  
[7] 冯尚友. 水资源系统工程[M]. 武汉: 湖北省科学技术出版社, 1991: 35-40.

(收稿日期: 2005-11-08 编辑: 骆超)